Journal of Technology Research (JTR)
Volume 5, Issue 1, (2025), pp 000-000, ISSN 3005-639X

Economic Feasibility Analysis of Grid-Connected Solar Power Plants in Desert Regions

Salamah O. Ihfedah[1], Mohammed A. Al-Madani [*2], Ihab A. Qaddoura[3]
Adam A. Qureshi[4], Abu al-Qasim M. Al-Ghanudi[5] and Fahad S. Rajab[6]

[1] Electrical and Electronic Department, Higher Institute of Science and Technology, Tamzawa, Al-Shati Libya.
[2] Metallurgical Engineering Department, Petroleum and Mining Engineering Faculty, Suez University, Suez, Egypt.
[3, 4, 5 and 6] Renewable Energy Department, Faculty of Technical Sciences, Mahruqa, Al-Shati, Libya.
*moh.ibrahim@sebhau.edu.ly

Received: 03-10-202* | Accepted: 14-10-202* | Available online: 15-12-202* | DOI:10.26629/jtr.2025.**

ABSTRACT

The electricity crisis in Libya is a complex crisis, combining technical and administrative components. One of the most prominent solutions to address the problem of increasing demand for electricity is the use of solar energy. Desert areas are among the best locations for establishing solar power plants due to the abundance of solar radiation, the vast unused areas, and the low cost of land. Grid-connected solar power plants represent a cost-effective investment in most regions, especially as costs continue to decline and efficiency increases. The success of these projects depends on careful planning and a detailed feasibility study for each individual site. This study evaluates the generating capacity of solar photovoltaic systems at multiple locations in desert areas within Libya. In this research, to model the physical behavior of the power system, in addition to estimating the total cost of installing and operating the system during its expected lifetime, the Homer program was used. Through the results extracted from the economic feasibility analysis of the hybrid solar energy system (330 kW panels and 280 kW inverter) connected to the public grid, the data shows that the project has a high economic feasibility. Given that the cost of generating electricity was extremely low (0.02425 kWh), the total project cost was approximately 316,295 Libyan dinars. The data also confirms that solar panel costs represent the largest portion of the project's overall expenditures. Finally, solar power plants connected to the public electricity grid represent a strategic option with high benefits in the medium and long term.

Keywords: Solar Energy, Electrical Gird, HOMER, Economic Analysis of Renewable Energy.

تحليل الجدوى الاقتصادية لمحطات الطاقة الشمسية المربوطه بالشبكة فى المناطق الصحروية

سلامة عمر أحفيظة[1]، محمد الكيلاني المدني[2*]، إيهاب علي أقدورة[3]، آدم عبدالفتاح قرشي[4]،
أبوالقسم محمد الغنودي[5]، فهد صالح رجب[6]
[1] قسم الكهربية والألكترونية ، المعهد العالي للعلوم والتكنولوجيا ، تامزاوه ، الشاطئ، ليبيا
[2] قسم هندسة الفلزات ، كلية هندسة البترول والتعدين ، جامعة السويس ، السويس، مصر
[3, 4, 5, 6] قسم الطاقات المتجددة، كلية العلوم التقنية، محروقة، الشاطئ، ليبيا

ملخـــــــــص البحـــــــــث

"Articles published in *J Technol Res* are licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License."

Journal of Technology Research (JTR)
Volume 5, Issue 1, (2025), pp 000-000, ISSN 3005-639X

أزمة الكهرباء في ليبيا هي أزمة معقّدة، تجمع بين مكونات تقنية وإدارية ، وقد ازدادت عوامل بيئية مثل موجات الحرارة الشديدة التي تزيد الحمل على الشبكة. آثار هذه الأزمة خطيرة وشاملة، تتراوح من المخاطر على الصحة العامة والسلامة إلى الإضرار بالاقتصاد اليومي للمواطنين وتهديد الاستقرار الاجتماعي. من أبرز الحلول للتصدي لمشكلة تزايد الطلب على الكهرباء هو استخدام الطاقة الشمسية الكهروضوئية. وتعد المناطق الصحراوية من أفضل المواقع المناسبة لإنشاء محطات الطاقة الشمسية الكهروضوئية بسبب وفرة الإشعاع الشمسي واتساع المساحات غير المستغلة وانخفاض تكلفة الأرض. تمثل محطات الطاقة الشمسية الكهروضوئية المتصلة بالشبكة استثماراً مجدياً اقتصادياً في معظم المناطق، خاصة مع استمرار انخفاض التكاليف وزيادة الكفاءة. نجاح هذه المشاريع يعتمد على التخطيط الدقيق ودراسة الجدوى التفصيلية لكل موقع على حدة. تُقيّم هذه الدراسة القدرة التوليدية لأنظمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية في مواقع متعددة في مناطق صحراوية داخل ليبيا. في هذا البحث لنمذجة التصرف الفيزيائي لنظام الطاقة بالإضافة إلى تقدير التكلفة الكلية لتركيب وتشغيل النظام خلال مدة العمر الافتراضية استُخدم النظام البرمجي هومر (HOMER PRO). من خلال النتائج المستخلصة لتحليل الجدوى الاقتصادية لنظام الطاقة الشمسية الهجين (330 كيلوواط ألواح و280 كيلوواط محول) والمتصل بالشبكة العامة للكهرباء، تُظهر البيانات أن المشروع يتمتع بجدوى اقتصادية عالية، حيث إن تكلفة إنتاج الكهرباء كانت منخفضة للغاية (0.02425 كيلوواط في الساعة)، وبلغت التكلفة الإجمالية للمشروع تقريبًا (316,295 دينار ليبي). وتؤكد البيانات أيضاً أن مصاريف الألواح الشمسية تمثل الجزء الأكبر منتفقات المشروع ككل. ويستخلص من هذه الدراسة البحثية أن محطات الطاقة الشمسية الكهروضوئية المرتبطة بالشبكة الكهربائية العامة تمثل خياراً استراتيجياً وذات فائدة عالية على المدين المتوسط والبعيد.

الكلمات الدالة: الطاقة الشمسية، الشبكة الكهربائية، هومر، التحليل الاقتصادي للطاقة المتجددة.

"Articles published in *J Technol Res* are licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License."

1. المقدمــة

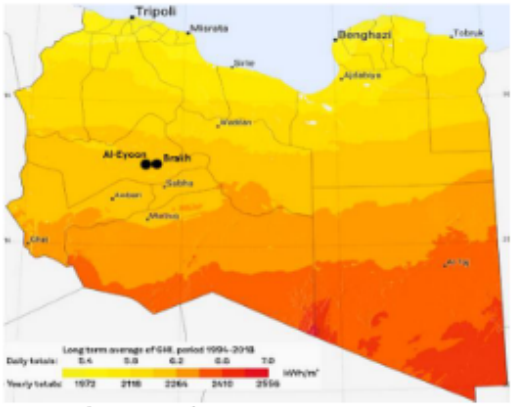
أزمة الكهرباء في ليبيا تُعتبر من القضايا المعقدة التي تفرض ضرورة البحث عن حلول عاجلة وأخرى طويلة المدى. على المدى القريب، تُركز الجهود على تعزيز استخدام مصادر الطاقة المتجددة وترشيد استهلاك الكهرباء. في عام 2017، أفادت الشركة العامة للكهرباء في ليبيا أن الطاقة الكهربائية المتاحة للشبكة بلغت 4900 ميجاواط، بعجز قدره 1600 ميغاواط [1]. نتيجةً لذلك تفاقمت أزمة انقطاع التيار الكهربائي في معظم مناطق ليبيا وخصوصاً في الجنوب. ومن بين الخيارات الأكثر فعالية للتعامل مع ارتفاع الطلب على الطاقة، يبرز استغلال الطاقة الشمسية كحل مبتكر ومُستدام. تتميز ليبيا بقدرات كبيرة في مجال الطاقة الشمسية، إذ تستفيد من أكثر من 3200 ساعة من السطوع الشمسي على مدار العام، بالإضافة إلى معدل إشعاع شمسي مرتفع يبلغ 8.1 كيلوواط/ساعة لكل متر مربع في المناطق الجنوبية. هذه العوامل تجعل من ليبيا مكانًا واعدًا للاستثمار في مجالات الطاقة الشمسية. تتمتع ليبيا بفترات طويلة من سطوع الشمس تصل إلى قرابة 8 ساعات يومياً، إلى جانب مساحات واسعة من الأراضي، مما يجعلها بيئة ملائمة لتبني أنظمة الطاقة الشمسية. جدول (1) يستعرض إمكانيات الطاقة الشمسية في ليبيا [2].

جدول رقم(1): تقيم إمكانات الطاقة الشمسية في ليبيا [2]

الموارد الشمسية و حرارة الهواء	(كيلوواط/ساعة/ متر مربع) سنوياً	(واط ساعة/ متر مربع) يومياً
الإشعاع العالمي الأفقي	1956	5359
الإشعاع الطبيعي المباشر	1937	5307
الإشعاع المنتشر الأفقي	708	1940
الإشعاع العالمي المائل	2142	5868 (مائل بزاوية 26° متجهًا نحو 180°)
درجة حرارة الهواء	18.5 درجة مئوية	–

أزمة انقطاع الكهرباء في ليبيا تمثل إحدى أبرز المشكلات التي تعيق الحياة اليومية للمواطنين بشكل كبير، مما يجعل البحث عن حلول مستدامة أمرًا ضروريًا. ويبرز الاعتماد على الطاقة الشمسية كخيار واعد لتحسين كفاءة الشبكة الكهربائية وتخفيف الضغط عليها. من المهم أيضًا إجراء دراسة تحليلية لمدى الجدوى الاقتصادية لتطبيق تلك الحلول لضمان استدامتها وفعاليتها على المدى الطويل. هذا البحث يهدف إلى تطوير خطة شاملة لدمج الطاقة الشمسية ضمن المجتمعات السكنية في ليبيا، مع التركيز بشكل خاص على المناطق الصحراوية. يسعى المشروع إلى تعزيز شبكة الكهرباء الوطنية من خلال حلول مستدامة، بالإضافة إلى دراسة الجدوى التقنية والاقتصادية للنظام الشمسي المقترح لضمان فاعليته وقابليته للتطبيق. تبرز أهمية دراسة الجدوى الاقتصادية لمحطات الطاقة الشمسية المرتبطة بالشبكة في المناطق الصحراوية من خلال عدة جوانب حيوية. أولاً، تسهم بشكل فعّال في استغلال الموارد الطبيعية، لا سيما الطاقة الشمسية الوفيرة التي تتميز بها تلك المناطق. ثانيًا، تسهم في تزويد الشبكة العامة بالكهرباء المتجددة، مما يساعد على تقليل الاعتماد على المصادر التقليدية ويساهم في تعزيز استقرار الإمداد بالطاقة. ثالثًا، إنتاج الطاقة النظيفة يُقلل من انبعاثات الكربون، مما يدعم أهداف التنمية المستدامة ويعزز حماية البيئة. إضافة إلى ذلك، تُعد مشاريع الطاقة الشمسية محركًا لتنمية الاقتصاد المحلي؛ فهي توفر فرص عمل جديدة، تجذب الاستثمارات، وتساهم في تحسين البنية التحتية للمنطقة. علاوةً على ذلك، تتيح هذه المشاريع استغلال الأراضي الصحراوية الواسعة بطريقة مثلى دون المساس بالمناطق الزراعية أو السكنية، مما يجعلها خيارًا استراتيجيًا لتحقيق التوازن بين التنمية والبيئة. الطاقة الشمسية تعني الضوء والحرارة التي تُستمد من الشمس، ويتم تحويلها إلى طاقة قابلة للاستخدام من خلال تقنيات حديثة مثل الخلايا والألواح الشمسية. تُستخدم هذه التقنيات لتوليد الكهرباء في المباني ولأغراض التدفئة. ورغم أن ليبيا تُعتبر أول دولة عربية اعتمدت الطاقة الشمسية، إلا أنها تُواجه حاجة ملحة لتطوير قوانين الكهرباء بما يعزز استخدام الطاقة النظيفة ويساهم في رفع مستوى التنافسية. ومن الضروري إعادة تخصيص الدعم لصالح مصادر الطاقة المستدامة وتطبيق تشريعات فعالة لضمان إدارة موارد الطاقة بشكل أفضل وحماية حقوق المستهلكين. بالإضافة إلى ذلك، تحتاج البلاد إلى تحديث نظام تعريفة الكهرباء وإيجاد آليات لجذب الاستثمارات في مشاريع الطاقة البديلة. الانتقال نحو الطاقة المتجددة أصبح ضرورياً لتحقيق مستقبل أكثر استدامة [3]. حتى وقت قريب، كانت مصادر الوقود الأحفوري تُهيمن على توليد الطاقة الكهربائية عالميًا، حيث كانت الكهرباء الناتجة عنها أقل تكلفة مقارنة بالكهرباء المولدة من مصادر الطاقة المتجددة. بناء محطات الطاقة التي تعتمد على الوقود الأحفوري كان يتميز بانخفاض تكاليفه بشكل كبير، إذ أن تكلفة إنشاء محطة تعمل بالفحم كانت أقل بكثير مقارنة بمحطة للطاقة الشمسية أو الرياح، حيث كانت تكلفة المحطة الشمسية أعلى بنسبة 223%، بينما تجاوزت تكلفة محطة الرياح تلك العاملة بالفحم بنسبة 22% [4]. لكن الأمور تغيرت في الوقت الراهن، إذ أصبحت مصادر الطاقة المتجددة الآن الخيار الأقل تكلفة مقارنة بالوقود الأحفوري. هذا الانخفاض الملحوظ في تكاليف إنتاج الطاقة المتجددة ساهم بشكل كبير في زيادة الاستثمارات وبناء المزيد من

المحطات المستدامة. على سبيل المثال، في عام 2019 وحده، مثلت مصادر الطاقة المتجددة نسبة 72% من إجمالي الإضافات الجديدة في السعة العالمية لتوليد الكهرباء [4]. الطاقة الشمسية تُعد من أكثر المصادر الواعدة لإنتاج الطاقة في ليبيا، التي تُعتبر واحدة من الدول الأكثر تميزًا عالميًا في هذا المجال. تُظهر الإحصائيات أن متوسط ساعات سطوع الشمس يبلغ حوالي 3500 ساعة سنويًا، فيما تصل شدة الإشعاع الشمسي إلى 7.1 كيلو واط/متر مربع/يوم في المناطق الشمالية، وترتفع إلى 8.1 كيلو واط/متر مربع/يوم في المناطق الجنوبية. تشير البيانات الموضحة في الشكل (1) إلى توزيع شدة الإشعاع الشمسي على مختلف المناطق الليبية، في المناطق الجنوبية العميقة من ليبيا، فيبلغ متوسط توزيع الإشعاع الأفقي العالمي اليومي حوالي 7.1 كيلوواط/ساعة/متر مربع، بينما يبلغ متوسطه السنوي حوالي 2556 كيلوواط/ساعة/متر مربع [5].



شكل رقم (1): توزيع شدة الإشعاع الشمسي في ليبيا [5]

رمال السيليكا، التي تُعد أحد العناصر الأساسية في صناعة الخلايا الكهروضوئية، تتوفر بكميات كبيرة في صحراء ليبيا. وبالتالي، تمتلك الطاقة الشمسية في ليبيا آفاقًا واعدة. بالإضافة إلى ذلك، فإن الانتشار الواسع للإشعاع الشمسي في البلاد يعزز أهمية الاعتماد على الطاقة الشمسية كمصدر رئيسي لإنتاج الكهرباء في المستقبل.

برنامج هومر (**HOMER**) يعد أداة برمجية متطورة تُستخدم لتقييم وتصميم أنظمة الطاقة الهجينة، حيث يتم دمج مصادر الطاقة المتجددة مع التقليدية للحصول على حلول فعالة ومستدامة. يُعتبر هذا البرنامج المرجع العالمي في مجال نمذجة وتحسين أنظمة الطاقة الهجينة. يتم تشغيله بناءً على إدخال بيانات تشمل تكاليف المكونات ومدى توفر مصادر الطاقة، ليقوم بتشغيل نموذج محاكاة يعتمد بشكل أساسي على هذه البيانات. يوفر البرنامج إمكانية محاكاة مجموعة متنوعة من تكوينات النظام المختلفة، مع توليد نتائج مفصلة تُعرض في صورة قائمة خيارات منطقية. يتميز بقدرته على محاكاة النظام الكهربائي على مدار 8760 ساعة سنويًا، حيث يُحسب التوازن الطاقي في كل خطوة زمنية على مدار العام [6].

وعقب انتهاء عملية المحاكاة، يتم تقديم قائمة بالتكوينات المثلى التي تسهم في دعم اتخاذ القرار واختيار أفضل البدائل المتاحة بناءً على مقارنة النتائج من الجوانب الفنية والاقتصادية. علاوةً على ذلك، يسمح البرنامج بعرض النتائج باستخدام تمثيلات رسومية وجدولية، مما يساهم في تقييم أداء كل نظام من حيث الكفاءة والتكلفة. عملية المحاكاة في هذا النظام تعتمد على حسابات توازن الطاقة لكل فترة زمنية خلال السنة. يتم خلالها مقارنة الطلب على الكهرباء والطاقة الحرارية في تلك الفترة مع الطاقة التي يستطيع النظام تقديمها. بناءً على ذلك، يتم حساب تدفقات الطاقة الداخلة والخارجة لكل عنصر من عناصر النظام [6]. يقوم برنامج هومر بإجراء الحسابات اللازمة لكل تكوين نظام يتم اختياره للدراسة. بعد ذلك، يقوم بتحديد مدى جدوى هذا التكوين، أي ما إذا كان قادراً على تلبية الطلب على الكهرباء ضمن الشروط المحددة. كما يقدّر تكلفة تركيب النظام وتشغيله طوال العمر الافتراضي للمشروع. يتم احتساب تكاليف النظام بناءً على مجموعة من العناصر، مثل التكلفة الرأسمالية، تكلفة استبدال المعدات، التشغيل والصيانة، الوقود، والفائدة [6]. برنامج هومر يُعد أداة قوية لمحاكاة وتحسين أنظمة الطاقة المتجددة، سواء كانت متصلة بالشبكة الكهربائية أو تعمل بشكل مستقل. يهدف البرنامج إلى معالجة التحديات المرتبطة بتقطع الموارد المتجددة وعدم استقرارها. يُتيح للمستخدمين تقييم الجدوى الفنية والاقتصادية لمزج مختلف مصادر الطاقة، مثل الألواح الشمسية، توربينات الرياح، المولدات، البطاريات، وغيرها، من خلال إجراء محاكاة دقيقة وتحليلات حساسية تُراعي تغيرات التكاليف ومستوى توفر الموارد [7]. لحساب القدرة الناتجة من النظام الكهروضوئي، يتم استخدام المعادلة الرياضية التالية (1):

$$P_{pv} = P_{STC}\left[G_T + \beta_p\left(T_C - T_{STC}\right)\left(\frac{G_T}{G_{STC}}\right)\right] \quad \ldots (1)$$

حيث أن: (P_{pv}) القدرة الخارجة المُولّدة من النظام الكهروضوئي بالواط، (P_{STC}) الطاقة القصوى الخارجة تحت الظروف القياسية، (β_p) معامل القدرة - درجة الحرارة تحت الظروف القياسية (واط \ درجة مئوية) (T_C) درجة حرارة القياسية لسطح الخلية (درجة مئوية)، (H_T) الإشعاع الشمسي الحقيقي الساقط على الوحدة الكهروضوئية (واط\متر مربع)، (H_{STC}) حالة الاختبار القياسية لدرجة الحرارة (درجة مئوية) [8].

لحساب العائد على الاستثمار، يتم استخدام المعادلة الرياضية التالية (2):

$$ROI = \left[\frac{G_I - C_I}{C_I}\right] \times 100 \quad \ldots (2)$$

حيث أن: (ROI) العائد على الاستثمار، (G_I) الربح الإجمالي، (C_I) تكلفة الاستثمار [9]. يمكن الجمع بين

العائد على الاستثمار ومعدل العائد لتقييم المشاريع، حيث يركز معدل العائد على الإطار الزمني المرتبط بالمشروع. بالإضافة إلى ذلك، يمكن الاعتماد على صافي القيمة الحالية، الذي يأخذ بعين الاعتبار التغيرات في قيمة النقود بمرور الوقت بسبب تأثير التضخم. وعند استخدام صافي القيمة الحالية لتقدير معدل العائد، يُعرف هذا النهج عادة باسم معدل العائد الحقيقي [9]. ينبغي أن تحتوي المقدمة على التوصيف النظري لمشكلة البحث والأبحاث ذات الصلة الموافقة والمعارضة لرأي الباحث وأن تفسر المقدمة الغرض الرئيسي من العمل المقدم. من المهم جداً أن تحدد الأهداف الرئيسية أو الفرضيات بوضوح.

لقد درس العديد من الباحثين العلميين استخدام الطاقة الشمسية لتوليد الكهرباء. على سبيل المثال في عام 2025، أجرى إيفان أيوكيتا وويرنكار باسيل نساتيوي دراسةً لتوفير مصدر طاقة مستدام وموثوق للعاملين وأسرهم في المناطق النائية ذات الوصول المحدود إلى الشبكة في الكاميرون. باستخدام برنامج (PVSyst.) ، تمت محاكاة النظام لتقييم جدواه الفنية والاقتصادية. تشير النتائج إلى أن نظامًا للطاقة الشمسية الكهروضوئية ثابتًا ومتصلًا بالشبكة بقدرة 200 كيلوواط ذروة، قادر على توليد 389 ميجاوات ساعة من الكهرباء سنويًا بتكلفة طاقة موحدة تبلغ 0.0725 دولارً لكل كيلووات ساعة، وهو أقل من متوسط تعريفات الكهرباء المنزلية. وخلصت الدراسة إلى أن أنظمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية قادرة على توفير الكهرباء المستدامة وبأسعار معقولة [10].

في عام 2024، أجرى منعم المنفي وأخرون دراسة جدوى فنية واقتصادية لتركيب ألواح الطاقة الشمسية الكهروضوئية على الشبكة الكهربائية لمنزل سكني عائلي في عدد 6 مدن ليبية بمواقع مختلفة. تم أستخدام برنامج (HOMER Pro) لإجراء تقييم فني للجدوى الاقتصادية لنظام الطاقة الشمسية الكهروضوئية المتصل بالشبكة بسعة 15 كيلوواط. أشارت النتائج إلى أن التصميم قادر على توفير 85% من احتياجات المنزل من الكهرباء. وكانت الكفرة الموقع الأمثل من حيث الجدوى الاقتصادية والبيئية لشبكة الكهرباء ونظام الطاقة الشمسية الكهروضوئية، حيث بلغت التكلفة الأولية للنظام 9,570 دولارًا أمريكيًا، وتكلفة الطاقة 0.0314 دولارًا أمريكيًا. وخلصت الدراسة أن أنظمة الطاقة الكهروضوئية المتصلة بالشبكة السكنية تشكل خيارًا فعالًا لإدارة الطاقة في معظم المدن الليبية. [11].

في عام 2024، قام سلامة عمر إحفيظة وآخرون بتحليل الجوانب التقنية والاقتصادية لتقنيات تطوير الطاقة الشمسية في التجمعات السكنية في جنوب ليبيا الليبية. واستُخدمت كلاً من الأنظمة البرمجية التالية (HOMER PRO وSimulink MATLAB) في عملية المحاكاة. ويُعد هذا العمل مهمًا لتحليل فترة الاسترداد المخصومة لثلاثة أحمال الثلاثة. وعلى عكس الأحمال المنخفضة والمتوسطة، يُعد ذي الأحمال العالية عملياً أكثر من حيث فترة الاسترداد السريعة، وسيؤدي إلى عائد مالي من حيث التكلفة في غضون 6.2 سنة. لذلك، تتمتع الطاقة الشمسية الكهروضوئية، بالقدرة على أن تكون حلاً عملياً لانقطاعات التيار الكهربائي وتذبذباته في ليبيا [12].

في عام 2022، قام سعدون عايد وآخرون بتحليل الجدوى الاقتصادية والفنية لشبكة طاقة متجددة هجينة متصلة بالشبكة في ليبيا في مواقع مختلفة. حيث تم استُخدم برنامج (HOMER PRO). اختيرت سبع مدن مختلفة في ليبيا. أظهرت نتائج المحاكاة أن النظام المقترح مجدي اقتصاديًا في درنة وطبرق ومصراتة، ويتميز نظام هذه المدن بأقل تكلفة صافية حالية وتكلفة موحدة للطاقة، وأعلى طاقة يمكن بيعها للشبكة. يُعد التصميم المقترح لهذا النظام الهجين المتصل بالشبكة مناسبًا لجميع الظروف المناخية والبيئية ، بالإضافة إلى انخفاض أسعار الكهرباء، من العوامل المساهمة بشكل كبير [13].

في عام 2016، قام يوسف كاظم قاسم وأخرون بدراسة إمكانات الطاقة الشمسية وجدوى إنشاء محطة طاقة شمسية متصلة بالشبكة في ليبيا، موزعة على 22 موقعًا مختارًا بقدرة 10 ميجاوات باستُخدم نظام البرمجة المتداول (RET Screen) لتقدير إنتاج الطاقة والمعايير المالية. لوحظ أن أعلى مستوى للإشعاع الأفقي العالمي يقع في جنوب ليبيا، والذي تراوح بين 2100 و2500 كيلوواط/ساعة/متر مربع. و أعلى إنتاج للكهرباء 22067.13 ميجاواط/ساعة سُجّل في الكفرة، وأقل إنتاج في الجبل الأخضر بقيمة 17891.38 ميجاواط/ساعة. وقد تم تقدير الحد الأقصى للطاقة التي يمكن للمحطة توليدها بنحو 22.06 جيجاواط [14].

2. الجانب العملي والمنهجية:

تم اختيار موقع الدراسة ليشمل 25 منزلاً في منطقة العيون، وهي إحدى التجمعات السكنية التابعة لشعبية وادي الشاطئ في جنوب غرب ليبيا. تتميز المنطقة بوجود العديد من عيون الماء الطبيعية، ويبلغ إجمالي عدد سكانها تقريباً 5000 نسمة. الشكل (2) يوضح خريطة جوية للمنطقة، حيث تظهر الصورة مباني متناثرة ذات طراز معماري بسيط، محاطة بمساحات خضراء صغيرة تضفي جمالية على المكان.

تم قياس متوسط استهلاك الطاقة الكهربائية من الشبكة العامة لـ 25 منزلاً في منطقة العيون. بالإضافة إلى ذلك، تم تحليل أقصى حمل في محطة أم الجدوال (66 كيلوفولت) بالقرب من الشاطئ، والتي تُعد المصدر الرئيسي لتزويد منطقة العيون بالكهرباء, وتشتمل على محولين للطاقة الكهربائية (T1) و (T2), وتم أجراء مقارنة يومية لأقصى حمولة كهربائية للمحولين على مدار 31 يوماً. لإنجاز تصميم نظام الطاقة الشمسية الذي يهدف إلى تزويد 25 منزلاً بالكهرباء، تم إجراء دراسة تفصيلية تضمنت تحديد معدل الاستهلاك اليومي لكل منزل، وحساب القدرة الإجمالية المطلوبة لمنظومة الطاقة الشمسية بالكيلوواط. كما جرى تقدير التكلفة الإجمالية

للمشروع وتحديد المساحة اللازمة لتركيب الألواح الشمسية لضمان فعالية النظام واستدامته. إن الاستغناء عن البطاريات يغير طبيعة المشروع بشكل جذري، حيث يتحول من نظام مستقل خارج الشبكة (Off- Grid) قادر على توفير الكهرباء على مدار 24 ساعة، إلى نظام متصل بالشبكة (On-Grid). إن النظام الأول له تأثير أقل على الحمل من النظام الثاني. حيث أنه يغطي استهلاك الكهرباء أثناء النهار فقط، ويعتمد على شبكة الكهرباء العامة خلال الليل [14]. تم تحديد حجم ومكونات المنظومتين بشكل أساسي في حالتي الاستخدام (Off-Gird) و(On-Gird). كما تم إجراء حساب دقيق للتكاليف في كلتا الحالتين مع إجراء مقارنة تفصيلية بينهما. تشكل البطاريات حوالي 60% من التكلفة الإجمالية للمشروع. إذا كان الهدف الاستقلال عن شبكة الكهرباء، فإن نظام (On-Gird) هو الحل رغم تكلفته الباهظة. أما إذا كان الهدف تخفيض التكلفة، فإن النظام (Off-Gird) هو الخيار الامثل [14].

إجمالي استهلاك الطاقة اليومي لـ 25 منزلاً بمنطقة العيون يكون: (25*57.738) = 1443.45 كيلوواط\ساعة، وهي مقدار الطاقة الإجمالية المطلوبة لتلبية احتياجات جميع المنازل يومياً. لتحيل اقصى حمل فى للمحولات في محطة ام الجدول اقار الشاطىء والمزودة للكهرباء للمنازل قيد الدراسة بمنطقة العيون، تم متابعة أحمال المحولين (T1 محول 1) و (T2 محول 2) ولمدة 31 يوماً متتالية، وكانت نتائج أحمال المحولين معاً بالكيلوواط لكل ساعة كما هو مبين بالجدول رقم (3).

من خلال البيانات، يتضح أن أداء المحولين متقارب في معظم الأيام، مما يشير إلى توزيع جيد للأحمال بينهما. ومع ذلك هناك أستثناءات؛ حيث سجل أعلى حمل على الإطلاق للمحول الأول (T1) في اليوم 16 ، وأعلى حمل للمحول الثاني (T2) في يوم 9 و20. تتيح هذه المقارنة البصرية للمختصين في المحطة مراقبة أداء المحولات وتحديد أي أحمال غير متوازنة لضمان كفاءة واستقرار التشغيل.

شكل رقم (2): صورة جوية لمنطقة العيون – الشاطئ

3. النتائج والمناقشة / أو الاستنتاجات

اولاً: حسابات الاحمال الكهربائية

الجدول رقم (2) يوضح متوسط الاستهلاك اليومي للطاقة الكهربائية لكل جهاز منزلي على حدة في كل منزل من المنازل المستهدفة في الدراسة بمنطقة العيون .

جدول رقم (2): متوسط الاستهلاك اليومي لكل منزل

نوع الجهاز	العدد (وحدة)	القدرة (واط)	الاستهلاك اليومي (كيلوواط\ساعة)
المكيف	3	0970	23.280
الثلاجة	1	1780	04.272
الغسالة	2	0900	14.400
الفريزر	1	1800	04.320
المكواة	1	1100	00.550
المروحة	1	0065	00.520
الغسالة	1	1000	01.000
المصابيح	8	0010	00.960
الدلو	8	0016	01.536
الحضانة	1	0500	00.500
الشاحن	2	0100	01.600
التلفزيون	2	0300	04.800
الأجمالي			57.738

جدول رقم (3): أقصى حمولة للمحولين (T1) و(T2) لمحطة أم الجداول بأقار الشاطئ المغذية لمنطقة العيون

اليوم	التوقيت	الأحمال (T1) + (T2) (كيلوواط\ساعة)
01	21:00	113
02	17:00	105
03	21:00	115
04	20:00	111
05	12:00	104
06	18:00	108
07	19:00	106
08	22:00	109
09	21:00	114
10	21:00	113
11	20:00	109
12	08:00	107
13	11:00	103
14	19:00	111
15	12:00	103
16	18:00	112
17	22:00	107
18	20:00	110
19	21:00	109
20	21:00	116
21	12:00	105
22	20:00	107
23	19:00	110
24	18:00	105
25	20:00	110
26	20:00	104
27	17:00	107
28	20:00	105
29	19:00	106

30	20:00	110
31	21:00	113

الجدول (4) يبين تحليل بيانات القدرة الكهربائية (Electrical Power)) الواردة من محطة الجهد العالي بأم الجداول في أقار الشاطئ (مبينة في الشكل رقم 1, والتي تبعد عن منطقة العيون حوالي 15 كيلومتر) والمغذية لمنطقة العيون بالكهرباء , وقد تم متابعة أقصى حمولة للمحولين (T1) و (T2) خلال شهر يوليو (ذروة أرتفاع درجة الحرارة في فصل الصيف) ولمدة 31 يوماً. يتضح من خلال البيانات أن المحول (T2) يُظهر أداءً بقدرة أعلى مقارنة بالمحول (T2) حيث بلغت قدرته العظمى حوالي 62 كيلوواط, بينما القيمة العظمى للمحول (T1) بلغت حوالي 61 كيلوواط، وبشكل بشكل مستمر، سواء في حالات تشغيل المحولات الأدنى (Operation Minimum) أو حالات تشغيل المحولات القصوى (Maximum Operation).

من خلال بينات الجدول (4), نلاحظ أن أحمال المحول (T1) كانت أعلى في معظم الأيام, وسجل أقصى قيمة في اليوم (16). سجل المحول (T1) أعلى قيمة له في الشهر وبلغت 61 كيلوواط/ساعة، بينما كانت قراءة المحول (T2) في نفس اليوم أقل, بالمقابل، هناك أيام قليلة كانت فيها أحمال المحول (T1) أعلى، مثل اليوم (1) واليوم (29).

جدول رقم (4): اقصى قدرة للمحول (T1) والمحول (T2) في محطة الجهد الفائق ام الجداول اقار الشاطىء

محول (T1) كيلوواط	محول (T2) كيلوواط
55	58
52	53
56	59
55	56
51	53
52	56
53	54
54	55
56	58
55	58
52	57
51	56
51	56
54	58
56	53
61	53
55	58
55	55
52	57
56	52
54	53
51	56
53	59
56	54
52	58
55	56
51	53
58	54
55	56

ونخلص أن المحول (T1) تحمل العبء الأكبر من الأحمال الكهربائية في المحطة خلال شهر يوليو مقارنة بالمحول (T2).

ثانياً: حساب مكونات منظومة الطاقة الشمسية

نتائج حسابات أجمالي استهلاك الكهرباء من منظومة الطاقة الشمسية ل 25 منزلاً بمنطقة العيون وكانت 1443.45 كيلوواط\ساعة\يومياً, بحث أن معدل أستهلاك كل منزل حوالي 57.74 كيلوواط\ساعة\يومياً. ويعتبر معدل الأستهلاك هذا مرتفعاً نسبياً, فعلى سبيل المثال تشير الدراسات أن معدل استهلاك الكهرباء للأسر الحضرية في ماليزيا يبلغ 648.31 حوالي كيلوواط/ساعة شهريًا أي ما يعادل 21.58 كيلوواط\ساعة\يومياً [15], بحث كانت نسبة الزيادة في اليومي الأستهلاك من الكهرباء حوالي 37.40%. ويعزى هذا الأرتفاع في استهلاك الكهرباء ألى عدة أسباب من بينها غياب ترشيد أستهلاك الكهرباء عند أستخدام أجهزة تبريد الهواء وسخانات المياه وغيرها من الأجهزة والمعدات ذات الأستهلاك العالي للكهرباء.

المناطق الصحراوية في ليبيا تتمتع بمعدل اشعاع شمسي يتراوح من 5 الى 7 ساعات ذروة يومياً, ولحساب قدرة منظومة الطاقة الشمسية المطلوبة لعدد 25 منزلاً يتم قسمة معدل أستهلاك الكهرباء اليومي للمنازل على متوسط ساعات ذروة الأشعاع الشمسي. أظهرت النتائج أن قدرة منظومة الطاقة الشمسية المطلوبة لعدد 25 منزلاً تساوي حوالي 241 كيلوواط\ساعة, أي أن متوسط قدرة الطاقة الشمسية المطلوبة لكل منزل تساوي 9.52 كيلوواط\ساعة.

في هذا المشروع تطلب الأمر ألى أستخدام ألواح طاقة شمسية (Solar Panels) ذات كفاءة عالية بقدرة 550 واط, ولحساب عدد الأواح الشمسية المطلوبة لتغطية حاجة 25 منزلاً من الكهرباء يومياً تم قسمة القدرة المطلوبة لمنظومة الطاقة الشمسية على عدد ساعات ذروة الأشعاع الشمسي, وكانت عدد الألواح الشمسية المطلوبة 438 لوحاً شمسياً, أي بمعدل حوالي 17.52 لوحاً لكل منزل. نظراً للحاجة الماسة الى عاكسات صناعية فعالة (Industrial Inverters) قادرة على التعامل مع قدرة 241 كيلوواط. يمكن استخدام عاكس مركزي واحد كبير، أو أستخدام عدة عاكسات أصغر (String Inverters) بقدرة 50 ألى 100 كيلوواط وذلك لسهولة الصيانة وتوزيع المخاطر. ويجب أن تكون القدرة الأجمالية للعاكسات الصناعية مساوية أو أعلى من قدرة الألواح الشمسية, أي حوالي 250 كيلوواط. لتوفير الطاقة

الكهربائية ليلاً أو في الأيام ذات الطقس الغائم يمكن أستخدام بطاريات ضخمة لغرض تخزين الطاقة الكهربائية. ومن الأفضل استخدام بطاريات الليثيوم أيون (Lithium-ion) لتصميمها الخفيف الوزن وصغر حجمها، وأدائها الممتاز، وموثوقيتها العالية، ومتانتها الطويلة. علاوة على ذلك، تتميز بسهولة الاستخدام وخلوها من الصيانة [16]. ولغرض تخزين 50% من أجمالي استهلاك الكهرباء من منظومة الطاقة الشمسية تم حساب السعة التخزينية المطلوبة للبطاريات، وكانت النتيجة حوالي 722 كيلوواط\ساعة\يومياً.

يتم عادة تثبيت ألواح الطاقة الشمسية على أسطح المنازل أو على سطح الأرض، بناءً على حجمها ووزنها، وفي هذا المشروع تم تثبيت الألواح الشمسية المطلوبة (438) على سطح الأرض، وذلك بأستخدام هياكل حديدية.

لتوصيل التيار المستمر (DC) والتيار المتردد (AC) الخاصة بمنظومة الطاقة الشمسية تم أستخدام كابلات ذات قدرات تحمل عالية، وكذلك تم أستخدام صمامات وقواطع دوائر وأنظمة التوصيل الأرضي لحماية المنظومة.

لحساب المساحة الأرضية المطلوبة لتركيب ألواح الطاقة الشمسية تطلب ذلك أتباع القاعدة العامة التي توصي بأنه يلزم توفير مساحة 10 أمتار مربعة لنظام الطاقة الشمسية لكل قدرة 1 كيلوواط [17]. بناءً عليه فإن المساحة المطلوبة في هذا المشروع تكون (241 كيلوواط * 10 م²\كيلوواط = 2410 متر مربع)، أي أن المساحة المطلوبة قطعة أرض أبعادها حوالي (49.0 متر* 49.0 متر).

لتقدير التكلفة الإجمالية للمشروع، تم حساب كل بند على حدى كما هو مبين بالجدول رقم (5). وتعتبر هذه التكاليف تقريبية، بناءً على الأسعار في الوقت الحالي، وتتباين تكلفة تركيب نظام طاقة شمسية للمنازل وفق الموقع الجغرافي، و جودة الألواح، ونوعها وتكلفة التركيب كذلك تزداد التكلفة بسبب الحاجة ألى استخدام البطاريات التي تخزن الطاقة.

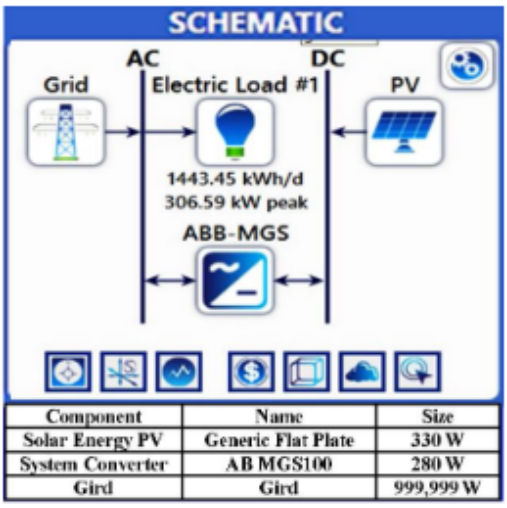
جدول رقم (5): تكاليف مشروع محطة الطاقة الشمسية لعدد 25 منزل بمنطقة العيون بوادي الشاطئ

البند	التكلفة التقديرية	الأجمالي
الألواح الشمسية	$0.20 لكل واط	$48,200
العاكسات	$0.15-0.10 لكل واط	$30,000
البطاريات	$400-250 لكل كيلوواط	216,600
الهياكل والمكونات	15-20 % من التكلفة الأجمالي	$40,000
التركيب والهندسة	15-20 % من تكلفة المعدات	$30,000
الأجمالي		$364,800

من خلال البيانات في الجدول (5)، يتضح أن تكاليف البطاريات تمثل حوالي 60% من التكلفة الأجمالية للمشروع، وعليه فإنه لتقليل تكاليف المشروع يمكن الأستغناء عن البطاريات لتخزين الطاقة وربط نظام الطاقة الشمسية بالشبكة العامة. تُقدر تكلفة التشغيل والصيانة (إزالة الغبار عن سطح الوحدات الكهروضوئية) بحوالي 20 دولارًا أمريكيًا\كيلوواط\ساعة، ونظرًا لأن عدد الألواح لنظام الطاقة الشمسية لهذا المشروع يعتبر كبير نسبيا (438)، فإنه يحتاج التنظيف والصيانة [11].

ثالثاً: تصميم النظام بأستخدام (HOMER)

يوضح الشكل (3) نظامًا منزليًا للطاقة الشمسية الكهروضوئية متصلًا بالشبكة الكهربائية. تم اقتراح نظام بقدرة 241 كيلوواط، يتكون من 438 وحدة ألواح شمسية، بقدرة اسمية 550 واط لكل منها، بمساحة إجمالية قدرها 2410 أمتار مربعة. بالإضافة إلى ذلك، استُخدمت خمسة محولات طاقة بقدرة 50 كيلوواط\عاكس. تُوصل الخلايا على التوالي أو بالتوازي لزيادة التيار أو الجهد المولد من الخلايا. في هذه الحالة، يُستخدم العاكس لتحويل التيار المستمر (DC) الذي تولده الخلايا إلى تيار متردد (AC).

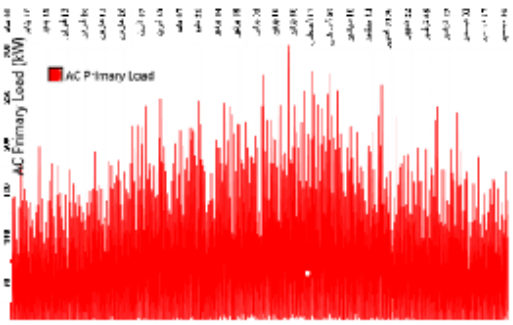


Component	Name	Size
Solar Energy PV	Generic Flat Plate	330 W
System Converter	AB MGS100	280 W
Gird	Gird	999,999 W

شكل رقم (3): مخطط تصميم نظام الطاقة الشمسية الكهروضوئية على الشبكة باستخدام برنامج (HOMER)

شكل (4) يبين تحليل برنامج (HOMER) لنتائج حمل التيار الكهربائي المتردد (AC Primary Load) على مدار السنة للـ 25 منزلاً المستهدفة في الدراسة، تُظهر البيانات بوضوح وجود نمط موسمي متكرر في متوسطات الحمل الأساسي الشهري للتيار المتردد، حيث يبدو هذا النمط مرتبطاً ارتباطاً وثيقاً بالظروف المناخية السنوية. يتضح أن أدنى مستويات الاستهلاك تُسجل خلال أشهر الشتاء، إذ تصل القيمة الوسطية إلى حوالي 50 كيلوواط في شهري يناير وفبراير منخفض بسبب فترات

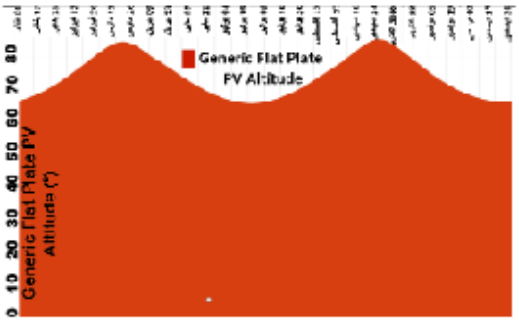
سطوع الشمس القصيرة. ومع دخول فصل الربيع، يبدأ الحمل الأساسي في الارتفاع تدريجياً، ليبلغ ذروته القصوى خلال أشهر الصيف، خاصة في يوليو وأغسطس، حيث تتجاوز القيم المتوسطة (median) 200 كيلوواط، وتصل قمم الاستهلاك إلى أكثر من 300 كيلوواط في شهر يوليو. عند المقارنة بين الفصول، نجد أن متوسط الحمل الصيفي في ذروته يفوق نظيره في الشتاء بنسبة تزيد عن 300%. هذا يشير إلى أن الحمل الأساسي للنظام يتأثر بشكل رئيسي بأنظمة تبريد الهواء المستعملة بشكل مفرط في هذه الفترة من السنة. بالإضافة إلى ذلك، تُظهر البيانات خلال فصل الصيف تقلبات ملحوظة في معدلات الاستهلاك اليومي، إضافةً إلى ذلك، تُظهر الخطوط المعبرة عن طول المدى الربعي تقلبات واختلافات ملحوظة في الاستهلاك خلال الصيف، مقارنةً بالاستقرار النسبي في فصل الشتاء. يعكس هذا التفاوت التغيير اليومي في درجات الحرارة والحاجة المتجددة لنظم التبريد أثناء الفصول الحارة.



شكل رقم (4): حمل التيار الكهربائي المتردد على مدار السنة للـ 25 منزلاً المستهدفة في الدراسة.

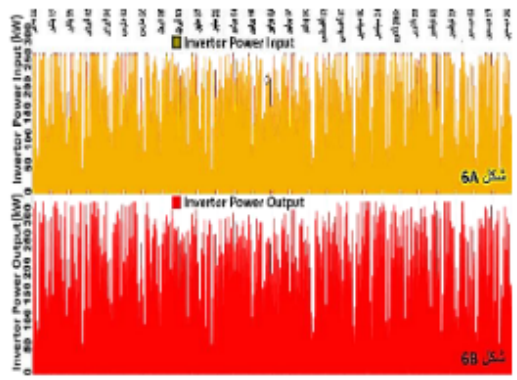
شكل رقم (5) يبين السعة القصوى المتاحة من محطة الطاقة الشمسية. ويمثل الرسم البياني تصوراً لتوزيع ثنائي الذروة (bimodal distribution)، حيث يتضح جلياً أنهما متماثلتان تقريباً في الشدة، كل منهما تصل إلى ما يقدر بـ 90-95% من السعة القصوى المتاحة، والتي تمثلها الأعمدة الرأسية الخلفية. يشير هذا التماثل إلى أن نسبة شدة الذروة الأولى إلى الثانية هي 1:1 تقريباً. تفصل بين هاتين القمتين منطقة انخفاض نسبي، حيث تهبط شدة المتغير إلى حوالي 80-85% من قيمة الذروة، مما يعكس انخفاضاً مؤقتاً في النشاط أو التردد بنسبة تتراوح بين 15-20%. إن وجود هامش ثابت بين قمم الأعمدة البيضاء والمنحنى البرتقالي يشير إلى أن النظام يعمل ضمن سعته التشغيلية ولا يصل إلى الحد الأقصى المطلق، حتى في فترات الذروة.

شكلي (6A) و (6B) يبينان تحليل برنامج (HOMER) لنتائج الطاقة الداخلة الى والخارجة من المحولات العاكسة (Invertors Input and Output Power) على التوالي على مدار السنة. تُظهر البيانات أن الطاقة الداخلة تعمل بمستوى أداء عالٍ ومستقر، حيث تتراوح قيمتها بين



شكل رقم (5): السعة القصوى لمحطة الطاقة الشمسية

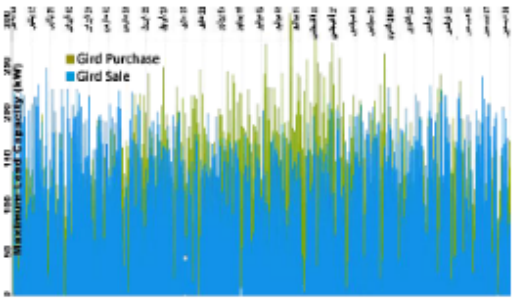
85 و95 كيلوواط، مع متوسط أداء يقارب 90% من السعة القصوى. في المقابل، تعكس الطاقة الخارجة من المحول العاكس سلوكًا ديناميكيًا ومتقلبًا، مما يعبر عن طبيعة الأحمال المستهلكة. تتأرجح قيم الطاقة الخارجة بشكل ملحوظ بين ذروة تصل إلى 85 كيلوواط وقاع ينخفض إلى 30 كيلوواط. عند مقارنة القيمتين العظميين للطاقة الداخلة (95 كيلوواط) والطاقة الخارجة (85 كيلوواط)، يتضح أن النظام لم يصل في أي وقت إلى طاقته الإنتاجية القصوى. والأهم من ذلك، يظهر الفارق المستمر بين الطاقة الداخلة والخارجة عند أي لحظة كتمثيل مرئي للطاقة المفقودة الناتجة عن كفاءة المحول العاكس غير المثالية.



شكل رقم (6): الطاقة الداخلة والخارجة للمحولات العاكسة

يُبرز الرسم البياني في الشكل (7) التفاعل الديناميكي بين عمليات استيراد وتصدير الطاقة داخل الشبكة الكهربائية على مدار السنة. تظهر المشتريات مُحددة باللون الأزرق، بينما تُبرز المبيعات باللون الأخضر. يتضح أن المشتريات تهيمن خلال فترات عدم إنتاج الطاقة الشمسية، مثل فترة الليل، حيث تصل إلى ذروة استهلاك تقارب 85% من القدرة القصوى لتغطية الأحمال الأساسية. في المقابل، تُركز المبيعات بشكل رئيسي خلال منتصف النهار، عندما تكون أشعة الشمس في أوج قوتها، مما يؤدي إلى فائض في الإنتاج الشمسي يصل إلى ذروة تصدير تُقدر بحوالي 60% من السعة. تحليل نمطي الاستيراد والتصدير يكشف

عن فعالية النظام في تحقيق الاكتفاء الذاتي خلال ساعات النهار، مع استغلال الفائض الناتج لتحقيق عوائد من تصدير الطاقة للشبكة. في الوقت ذاته، يعتمد النظام على الشبكة الكهربائية كمصدر دعم رئيسي خلال فترات الليل، مما يعكس نموذجاً متكاملاً وفعّالاً لأنظمة الطاقة المتجددة المترابطة بالشبكة.



شكل رقم (7): مبيعات ومشتريات محطة الطاقة الشمسية من القدرة الكهربائية بالكيلوواط سنوياً

جدول رقم (6): مبيعات ومشتريات محطة الطاقة الشمسية

البند	الناتج
قدرة المحطة	330 كيلوواط
قدرة المحول	280 كيلوواط
مصدر الطاقة الأحتياطي	الشبكة الكهربائية العامة
نسبة الطاقة المتجددة	64.1%\الإجمالي
التكلفة الأولية	219,582 (د.ل.)
تكلفة الإنتاج	0.0241 د.\كيلوواط
تكلفة الصيانة	6,003 (د.ل.)

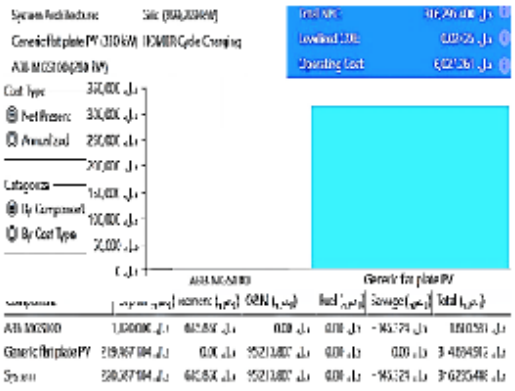
استناداً إلى النتائج التي قدمها برنامج هومر، يمكن تحقيق التصميم الأمثل لنظام طاقة شمسية هجين متصل بالشبكة كخيار اقتصادي وفعّال لتلبية احتياجات الأحمال الكهربائية لـ 25 منزلًا في منطقة العيون بوادي الشاطئ وفقًا للمواصفات والمميزات المدرجة في الجدول (5). يتضح من النتائج المذكورة أن هذا المشروع يتمتع بجدوى اقتصادية كبيرة، إذ أن الاعتماد على الطاقة الشمسية يسهم بشكل فعّال في تخفيض تكلفة الكهرباء ويُلبي معظم احتياجات الطاقة، مما يجعله خياراً استثمارياً ناجحاً ومُستداماً على المدى البعيد.

الجدول (6) والشكل (8) يبينان تحليل الجدوى الاقتصادية وتوزيع التكاليف لنظام الطاقة الشمسية الهجين لعدد 25 منزلاً بمنطقة العيون وذلك باستخدام برنامج (HOMER)، يتبين من المعطيات الواردة في الجدول وكذلك الشكل أن أجمالي صافي تكلفة مشروع أنشاء محطة طاقة شمسية لتزويد الـ 25 منزلاً (Total Net Cost, TNC) تقدر بـ 316,295,400 دينار ليبي لفترة زمنية من 25 الى 30 سنة، وتشمل هذه القيمة النقدية تكاليف شراء المعدات والتركيب والصيانة وكذلك استبدال قطع الغيار.

قُدر متوسط تكلفة إنتاج كل كيلوواط/ساعة والتي تعرف أيضاً بالتكلفة الموحدة للكهرباء التي تنتجها المحطة (Levelized Cost of Electricity, COE) بحوالي 0.02425 دينار ليبي لكل كيلوواط، وتعتبر هذه التكلفة منخفضة نسبياً بحوالي 14% مقارنة بالتكلفة ذاتها في المرجع [11] والتي قدرت بـ 0.0314 دولار أمريكي (حوالي 0.1746 دينار ليبي حسب سعر مصرف ليبيا المركزي لعام 2024، 1 دولار = 5.5616 دينار ليبي). وأنخفاض هذه القيمة يعطي مؤشراً هاماً أن هذا المشروع ذو جدوى أقتصادية ممتازة.

بلغت التكلفة التشغيلية (Operating Cost) لمحطة الطاقة الشمسية 6,027.261 دينار ليبي سنوياً ، وهي تشمل تكاليف الصيانة الدورية للمحطة وكذلك تكاليف الكهرباء المستهلكة من الشبكة العامة.

بلغ صافي تكلفة الإنتاج (Net Cost of Production, NCP) حوالي 314,911 دينار ليبي. وتعتبر هذه التكلفة منخفضة نسبياً مقارنة بالتكلفة ذاتها في المرجع [11]، حيث أن صافي تكلفة تشغيل محطة الطاقة الشمسية بمدينة مرزق حوالي 79,215 دولار، أي ما يعادل 4,405,621,440 دينار ليبي، بمعدل أنخفاض حوالي 7%. وانخفاض تكلفة التشغيل يُعَدّ دليلاً إضافياً على أن المشروع يحقق نجاحاً كبيراً.



شكل رقم (8): تحليل الجدوى الاقتصادية وتوزيع التكاليف لنظام طاقة شمسية هجين لعدد 25 منزلاً بمنطقة

الشكل رقم (8) يبين تحليلاً للجدوى الاقتصادية وتوزيع التكاليف لنظام طاقة شمسية هجين لعدد 25 منزلاً بمنطقة العيون بوادي الشاطئ بجنوب ليبيا باستخدام برنامج (HOMER). لتقييم جدوى المشروع تم أجراء تحليل فترة استرداد رأس المال والعائد على الاستثمار لنظام الطاقة الشمسية (Simple Payback Period) ، وهي الفترة الزمنية التي يستغرقها المشروع الاستثماري لاسترداد التكاليف الأولية أو رأس المال المستثمر، وذلك من خلال صافي الأرباح الناتجة عن تشغيل المشروع. ويتم حسابها بواسطة قسمة التكلفة الأولية للمشروع على صافي الأرباح التي يحققها المشروع سنوياً. وتنص قاعدة

أسترداد رأس المال على أنه كلما كانت فترة استرداد تكلفة المشروع أقصر[18]، كان المشروع أكثر جدوى. بتطبيق ذلك على هذا المشروع، أظهرت النتائج أن استرداد تكلفة رأس المال يمكن أن يتم خلال فترة زمنية تقارب الثلاثون شهراً (2.43) سنة.

جدول رقم (7): حساب تكاليف المشروع بأستخدام برنامج هومر (HOMER)

Export...	Export All...	Sensitivity Cases Left on a sensitivity case to see its optimization results									Compare Economics	Column Choices...
Architecture						Cost					System				PV
			PV (kW)	Grid (kW)	MBB-MGS (kW)	Dispatch	COE (د.ل)	NPC (د.ل)	Operating cost (د.ل/yr)	Initial capital (د.ل)	Fuel cost (د.ل/yr)	O&M (د.ل/yr)	Ren Frac (%)	Total Fuel (l/yr)	Capacity	DC Capacity	Capital Cost (د.ل)
			330	999,999	280	CC	0.0241 د.ل	314,511 د.ل	6,063 د.ل	219,582 د.ل	0.00 د.ل	6,000 د.ل	64.1	0	330	0	219,446

4. الخاتمة والتوصيات

نظراً للزيادة السريعة في الحاجة إلى الكهرباء نتيجة للنمو السكاني في المناطق الجنوبية من ليبيا، بالإضافة إلى التحديات التي يواجهها قطاع إنتاج الكهرباء مثل ضعف الإنتاج بسبب تداخل العديد من العوامل الفنية والمالية والإدارية والسياسية، اضطرت الشركة العامة للكهرباء إلى تقليل الحمولة بشكل منتظم. هذا الأمر يؤثر بشكل سلبي على حياة الناس، وبالأخص في القرى البعيدة. ويعد استخدام أنظمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية المتصلة بالشبكة الكهربائية خياراً ملحاً لتوليد الطاقة النظيفة بواسطة الطاقة الشمسية. لقد أظهرت الأبحاث أن الاعتماد على الطاقة الشمسية لا يساعد فقط في تقليل التكاليف التشغيلية مقارنة بمصادر الطاقة التقليدية، بل يعزز أيضاً من أمان الطاقة الوطني ويقلل من الانبعاثات الكربونية. هذا يتماشى مع التوجهات العالمية نحو الطاقة النظيفة والمستدامة. ويساهم الانخفاض المستمر في أسعار وحدات الطاقة الشمسية الكهروضوئية ومكوناتها في تحقيق توازن قريب من مستوى الشبكة، بالإضافة إلى طول عمرها الافتراضي، واحتياجها القليل للصيانة، وانخفاض استهلاكها للطاقة. في هذه الدراسة، تمت دراسة جدوى نظام طاقة شمسية كهروضوئية متصل بالشبكة الكهربائية باستخدام برنامج هومر (HOMER) لنمذجة الطاقة المتجددة . تم إجراء دراسة جدوى لـ 25 وحدة سكنية في منطقة العيون بوادي الشاطئ في جنوب غرب ليبيا. من خلال تحليل النتائج التقنية والاقتصادية، وُجد أن إجمالي استهلاك الكهرباء من نظام الطاقة الشمسية لهذه الوحدات السكنية يقدر بـ 1443. 45 كيلوواط ساعة يوميًا. كما أن القدرة المطلوبة لنظام الطاقة الشمسية لهذه الوحدات تبلغ حوالي 241 كيلوواط ساعة، بينما تحتاج إلى 438 لوحًا شمسيًا، باستخدام 5 عاكسات بطاقة 50 كيلوواط لكل عاكس. أظهرت البيانات أن المشروع يمتلك جدوى اقتصادية جيدة، حيث كانت تكلفة إنتاج الكهرباء منخفضة بشكل كبير (0. 02425 دينار لكل كيلوواط ساعة)، وتبلغ التكاليف الإجمالية للمشروع حوالي 316,295 دينار ليبي. في الختام، توصل البحث إلى أن أنظمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية تمثل حلاً فعالًا لأزمة الطاقة في ليبيا بفضل الإمكانيات العالية للطاقة الشمسية والأسعار المنخفضة، مما يساعد على تقليل فترة استرداد التكلفة.

بناءً على ما توصلت إليه الدراسة، يمكن أدرج بعض التوصيات التي تفيد في دراسة الأبحاث المتعلقة بأنظمة الطاقة الشمسية، وهي كما يلي:

بما أن إنتاج الطاقة من نظام الطاقة الشمسية ليس دائمًا مستقرا خلال اليوم ويتغير أيضًا حسب فصول السنة، فإن هذا يمكن أن يؤدي إلى عدم استقرار الشبكة العامة. حيث يصبح من الصعب توفير الطاقة المطلوبة بشكل منتظم وآمن.

- لتثبيت وتشغيل أنظمة الطاقة الشمسية، يحتاج الأمر إلى مهارات هندسية مناسبة لضمان الربط الفعال والناجح للنظام مع الشبكة العامة.
- تحد قدرة الشبكة الكهربائية على استيعاب الطاقة من نظام الطاقة الشمسية محدودة، مما قد يسبب أحيانًا ضعفًا في نقل الطاقة من النظام إلى الشبكة العامة.
- بسبب التغيرات الصعبة في مستوى الجهد الكهربائي وصعوبة الحفاظ على استقراره، قد يكون من الصعب توصيل نظام الطاقة الشمسية بالشبكة الكهربائية العامة.

أما بخصوص التوصيات العامة والتي تهدف إلى تحسين الجدوى الفنية والاقتصادية لمشاريع الطاقة الشمسية المتصلة بالشبكة الكهربائية العامة, فهي كما يلي:

- تحسين السياسات بالعمل مع الحكومة المحلية في المناطق النائية، وإعداد خطط لدعم مشاريع الطاقة الشمسية، التي تتضمن تسهيلات استثمارية وإعفاءات من الضرائب لتحفيز الاستثمارات في هذا القطاع.
- تشجيع الأبحاث والدراسات التي تركز على المناخ في المناطق النائية، مثل ارتفاع درجات الحرارة والعواصف الرملية، من أجل إيجاد تقنيات مناسبة تتلاءم مع طبيعة هذه المناطق.
- تطوير بنية شبكة الكهرباء العامة وزيادة الاستثمار في تعزيز شبكات النقل والتوزيع، يساهم في ضمان اتصالية

محطات الطاقة الشمسية بالشبكة الوطنية. كما يسهم ذلك في تقليل الضغط على الشبكة العامة.

- ترشيد استهلاك الطاقة الكهربائية وتنظيم حملات توعوية في القرى والمدن، بالإضافة إلى تحفيز السكان على استخدام الأجهزة التي توفر الطاقة واتباع أنظمة العزل الحراري في المباني.

- تشجيع المشاريع الصغيرة للطاقة الشمسية في القرى و الأحياء السكنية, مما يساعد في خلق فرص عمل وتعزز مفهوم الاعتماد على الطاقات المتجددة.

- تعزيز فكرة الاستفادة من التجارب الإقليمية في البيئات المشابهة مثل الصحاري في الجزائر والمغرب ومصر، مما يسهم في بناء نموذج محلي ناجح يتناسب مع الخصوصيات المحلية في المناطق الصحراوية.

- يمكن أن يكون الاستثمار في تقنيات تخزين الطاقة مناسباً للمناطق النائية، مثل استخدام البطاريات التي تتحمل درجات حرارة مرتفعة أو النظم الهجينة التي تجمع بين الطاقة الشمسية والديزل، لتأمين استمرارية توفير الكهرباء.

5. المراجـــــــع

[1] Y. Kassem 1, H. Camur. 2, A. M. Abughinda 3. Solar Energy Potential and Feasibility Study of a 10MW Grid-connected Solar Plant in Libya. Engineering, Technology & Applied Science Research, 2020; Vol. 10, No. 04, pp. 5358–5366.

[2] M. Elmnifi 1, M. Amhamed 2, N. Abdelwanis 3, O. Imrayed 4. Solar Supported Steam Production for Power Generation in Libya, Acta Mechanica Malaysia (AMM), 2018; Vol. 2, No. 2, pp. 05–09.

[3] A. I. Review 1, A. Alkadeeki 2. Developing and Implementation of Clean Energy Sources in Libya, Abaad Iktissadia Review, 2024; Vol. 14, No. 01, pp. 346–367 .

[4] S. Makken. A Comprehensive Economic Analysis of Solar and Wind Power and its Suitability to Libya, The 1st International Conference on Renewable and Sustainable Energy in Elbieda, Libya, October 10-13, 2021; Vol. 01, pp. 294–302 .

[5] A. O. M. Maka 1, S. Salem 2, M. Mehmood 3. Solar Photovoltaic (PV) Applications in Libya: Challenges, Potential, Opportunities and Future Perspectives, Journal of Cleaner Engineering and Technology, 2021; Vol. 5, pp. 01–20.

[6] I. Panhwar 1, A. R. Sahito 2, S. Dursun 3. Designing Off-Grid and On- Grid Renewable Energy Systems Using HOMER Pro Software, Journal of International Environment Applied Science, 2017; Vol. 12, No. 04, pp. 270–285.

[7] K. A. Kavadias 1, P. Triantafyllou 2. Hybrid renewable energy systems' optimization: A review and extended comparison of the most-used software tools, Journal of Energies, 2021; Vol. 14, No. 24, pp. 01–28.

[8] A. A. Hafez 1, Y. F. Nassar 2, M. I. Hammdan 3, S. Y. Al-Sadi 4. Technical and Economic Feasibility of Utility-Scale Solar Energy Conversion Systems in Saudi Arabia, Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering, 2019; Vol. 44, No. 01.

[9] M. Hassanzadeh 1, T. B. Bigdeli. Return of Investment (ROI) in Research and Development (R&D): Towards a framework, 14th International Conference on Webometrics, Informetrics and Scientometrics & 19th COLLNET Meeting, 2018; pp. 31–39.

[10] Y. Ayuketah 1, W. B. Nsanyuy 2. Feasibility Study of a 200 kWp Solar PV System for Residential Camps in Remote Locations: Case Study of Ndawara Tea Estate, Cameroon, Journal of Energy Science & Engineering, 2025; Vol. 13, pp. 3945– 3953.

[11] M. Elmnifi 1, A. H. Mhmood 2, A. N. Abdullah Saieed 3, M. H. Alturaihi 4, S. K. Ayed 5, H. S. Majdi 6. A Technical and Economic Feasibility Study for on-Grid Solar PV in Libya, Journal of Mathematical Modelling of Engineering Problems, 2024; Vol. 11, No. 01, pp. 91–97.

[12] S. O. Ihfedah 1, M. A. Al-Madani 2, S. A. Gnefid 3. Techno-Economic Analysis of Solar Energy Developing Technologies in Libyan Residential Communities, Journal of Solar Energy and Sustainable Development, 2024; pp. 137–164.

[13] S. K. Ayed 1, M. Elmnifi 2, H. Moria 3, L. J. Habeeb. Economic and Technical Feasibility Analysis of Hybrid Renewable Energy (PV/Wind) Grid Connected in Libya for Different Locations, International Journal of Mechanical Engineering, 2022; Vol. 07, No. 01, pp. 930–943.

[14] A. Algaddafi 1, J. Alshahrani 2, S. Hussain 3, K. Elnaddab 4, E. Diryak 5, I. Daho 6. Comparing the Impact of the Off-Grid System and On-Grid System on a Realistic Load, 32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2016; pp. 2144–2150.

[15] S. S. S. Ali 1, M. Rizal-Razman 2, A. A. A. Awang 3, M. R. M. Asyraf 4, M. R. Ishak 5, R. A. Ilyas 6, R. John Lawrence 7. Critical Determinants of Household Electricity Consumption in a Rapidly Growing City, Malaysia, Journal of Sustainability, 2021; Vol. 13, No. 08, pp. 01–20.

[16] G. Zubi 1, R. S. Adhikari 2, N. E. Sánchez 3, W. Acuña-Bravo. Lithium-Ion Battery-Packs for Solar Home Systems: Layout, Cost and Implementation Perspectives, Journal of

Energy Storage, 2020; Vol. 32.

[17] A. Mathur 1, V. Prakash, Study and Design of 10 kWp Roof Top Solar PV System Special Reference to Suncity Todhpur (Rajasthan), 2nd International Conference on Large-Scale Gird Intergration of Renewable Energy in India, New Delhi, 2019.

[18] A. Kunduz, Financial Evaluation of Investment Projects, Arab Monetary Fund (Arabic Version), 2022; Issue. 27, pp. 08.

[19] S. K. Ayed 1, M. Elmnifi 2, H. Moria 3, L. J. Habeeb. Economic and Technical Feasibility Analysis of Hybrid Renewable Energy (PV/Wind) Grid Connected in Libya for Different Locations, International Journal of Mechanical Engineering, 2022; Vol. 07, No. 01, pp. 930–943.